



# KlimaProg

Forskningsprogram om klima og klimaendringer

<http://program.forskningsradet.no/klimaprog/>

## Istider og jordas stilling i forhold til sola

For 20 000 år siden var Skandinavia dekket av en 2-3000 meter tykk bre, og det var Svalbard-klima med permafrost helt ned til Frankrike. Kan store klimasvingninger som gir istider og mellomistider skyldes endringer i jordas stilling i forhold til sola?

### Jan Mangerud

Det var tøft for steinaldermenneskene i Europa for 20 000 år siden, de visste jo ikke at det var varmere tider i vente. Vi vet at det ble varmere – og vi forstår også noe om hvorfor. Allerede i 1920 publiserte den serbiske forskeren Milutin Milankovitch ganske presise beregninger av variasjonene i jordas stilling i forhold til sola, resultater som umiddelbart ble akseptert. Derimot ble hans teori om at disse forårsaket klimasvingningene som ga istider og mellomistider forkastet av de aller fleste forskere helt fram til slutten av 1970-årene. Den viktigste innvendingen mot teorien var at de astronomiske variasjonene ville gi altfor små klimautslag til å gi istider – et problem som enda diskuteres. I min tid som ung forsker hersket det en nesten utrolig forskningssituasjon: Vi visste at jorda har

gjennomgått enorme klimavariasjoner, som forårsaker at tykke innlandsiser har dekket Europa så langt sør som til Nederland, og i Nord-Amerika ned til New York og Midtvesten, men vi ante ikke årsaken til endringene. I denne artikkelen skal jeg først og fremst forklare de astronomiske variasjonene, og gi noen hint om deres klimabetydning. Jeg skal ikke forsøke å forklare klimavariasjonene fullt ut; det kan verken jeg eller andre gjøre enda.

Alle planetene i solsystemet påvirker hverandre med sin tyngdekraft. Dette fører til at jordas bane og stilling i forhold til sola forandrer seg sakte og nesten periodisk. Milankovitch beregnet disse variasjonene for hånd mens han satt som krigsfange under første verdenskrig – riktignok en privilegert fange fordi han var en fremragende forsker. I våre dager bruker vi beregninger

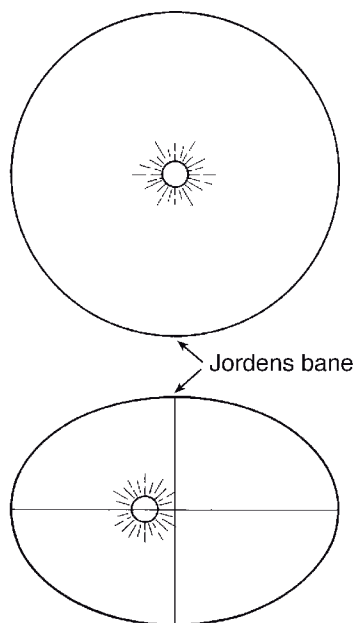
utført på datamaskiner av den belgiske astronom André Berger.

### Jordas bane forandrer seg

Jordbanen er en ellipse hvor formen på ellipsen varierer fra en nesten perfekt sirkel til en noe mer flatklemt ellipse (figur 1). Denne variasjonen følger sykluser på 100.000 og 400.000 år (figur 4). Dette gir en forskjell i årlig solinnstråling til toppen av atmosfæren på mindre enn 0,1 prosent, noe som nærmest er neglisjerbart. Den virkelige drivkraften til istider/mellomistider er omfordelingen av innstrålingen mellom årstider og mellom breddegrader, som omtales under. De dramatiske klimaendringer mellom istider og mellomistider skjer altså på tross av at den totale årlige solinnstråling til jordas atmosfære er nær konstant.

KlimaProg-Forskningsprogram om klima og klimaendringer (2002-2011) dekker naturvitenskapelig forskning som sikter på å øke forståelsen av klimasystemet og klimaendringer. Programmet hører inn under Norges forskningsråd og finansierer blant annet de store, koordinerte forskningsprosjektene AerOzClim, NOCLim, NORPAST og RegClim.

KlimaProg har sin egen redaksjon for å informere om forskningen i samarbeid med CICERO Senter for klimaforskning, og har egne sider i hvert nummer av tidsskriftet *Cicerone*.



**Figur 1.** Jordas bane varierer mellom å være nesten en sirkel og en mer flatklempt ellipse. Flatklemmingen er her sterkt overdrevet, i virkeligheten er avviket fra en sirkel svært lite.

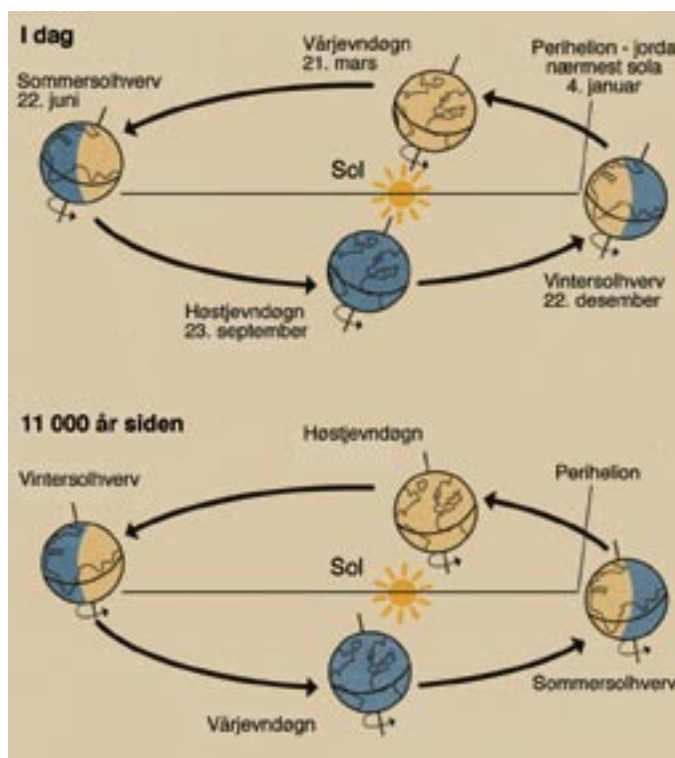
Mellomistidene, som vår egen tid, følger 100.000 årsrytmen, men det er fremdeles et mysterium hvorfor, da denne syklusen gir meget små variasjoner i innstrålingen.

#### Polarsirkelen går ikke alltid over Saltfjellet

Jordas akse står på skrå i forhold til jordbanen (figur 2). Ved vintersolverv (21. desember) peker nordpolen mest bort fra sola og vi nordmenn får korte og kalde dager. Vi ser fram til juni, da nordpolen peker mot sola og gir oss sommervarme og lyse netter. Hvis jordaksen hadde stått rett, ville det ikke vært årstider, og det ville vært kaldt året rundt på høye breddegrader.

Skråningen på akse er imidlertid ikke konstant, den forandrer seg med en periodisitet på 41.000 år. I dag er den  $23,5^\circ$ , og gir dermed en sydgrense for midnattssol, det vi kaller polarsirkelen, på  $66,5^\circ\text{N}$ . Vinkelen varierer mellom  $22,1$  og  $24,5^\circ$ . Hva dette betyr for polarsirkelen i Nordland er forklart på figur 3.

Rent kvalitativt er det lett å forstå betydningen for klimaet når jordaksen forandrer skråningsvinkel: Større skråning på akse gir varmere somre og kaldere vintre på høye breddegrader. Det blir altså større forskjell mellom årstidene, med økende forskjell jo nærmere polene en kommer. Utslaget er likt på begge halvkluler. En større skråning på akse øker også den totale innstråling



**Figur 2.** Jordas bane rundt sola. Den øverste figuren viser dagens situasjon. Fordi jordaksen står på skrå får vi årstider. Jorda er i dag nærmest sola (et punkt som kalles perihelion) 4. januar, og vinteren her nord blir derfor litt mildere. På den sydlige halvklule kan de glede seg over ekstra varme somre. Den nederste figuren viser at jorda for 11 000 år siden var nærmest sola i juni. Den gang var det altså ekstra varme somre på den nordlige halvklule.

på høye i forhold til lave breddegrader. Hvis man teoretisk tenker seg en vertikal jordakse, så ville sola alltid stå rett over ekvator, og polene ville ikke få noe innstråling.

Vi finner igjen 41.000 årssyklusen i fluktuasjoner i istidens breer. Går vi en million år tilbake, så dominerer denne syklusen klimavariasjonene, uten at vi sikkert vet hvorfor de andre da hadde mindre betydning.

#### Jorda oppfører seg som en snurrebass

Den tredje og siste variabelen kalles presesjon og er vanskeligst å se for seg geometrisk. Hvis en får god fart på en snurrebass, ser en at akse står ganske stille og peker på et punkt rett opp i taket. Etter hvert som farten avtar, begynner imidlertid akse å svinge i store sirkler, og peker mot forskjellige steder i taket, før snurrebassen til slutt faller.

Jorda er som en snurrebass som roterer om sin egen akse i løpet av et døgn. Samtidig svinger akse sakte rundt på samme måte som omtalt for snurrebassen. Akse vil derfor ikke alltid peke mot Polstjernen i "himmeltaket", slik den gjør i dag. Dette fører til at årstidene forflytter seg sakte rundt jordbanen, slik at vi i noen perioder er nær sola om vinteren, andre perioder om våren eller sommeren. Figur 2 viser at jorda i dag er nær sola ved vintersolverv; aller

nærmest er vi 4. januar. Dette gir oss på den nordlige halvklule forholdsvis milde vintre og kjølige somre. På den sydlige halvklule er det motsatt; de har sommer i januar når jorda er nærmest sola.

Som omtalt over er det skråningen på akse som gir årstider. Virkningen av presesjonen kan beskrives som en modifisering av årstidene: På den nordlige halvklule svekkes årstidene i dag, fordi vi er nærmest sola om vinteren. For 11.000 år siden var det motsatt (figur 2), da kom vintersolverv (21. desember) mens jorda var lengst unna sola, og det var ekstra kalde vintre og tilsvarende varme somre på vår halvklule. Virkningen på den sydlige halvklule er alltid motsatt.

Presesjonen varierer med frekvenser på 19.000 og 24.000 år (figur 4). Dens klimatiske betydning avhenger av den første faktoren som ble beskrevet: Hvis jordbanen er en sirkel, har jorda samme avstand til sola hele året, og det spiller ingen rolle hvor på jordbanen vinter og sommer faller. Jo mer elliptisk banen er, jo mer betyr presesjonen. Også disse syklusene finnes klart i istidsvariasjonene.

#### Astronomisk teori allment akseptert

De fleste regner at gjennombruddet for teorien kom i 1976, med artikkelen av Hays, Imbrie og Shackleton: "Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages". Gjennombruddet skyl-

des at en nå hadde fått lange kjerner fra dyphavet, slik at en kunne studere tids-serier av klimautviklingen langt tilbake i tid. Her kan en vise at pulsslagene i klimasvingningene den siste million år har fulgt rytmer på 100.000, 41.000, 24.000 og 19.000 år. Dette er jo akkurat de samme rytmene som jeg ovenfor har omtalt for de astronomiske variasjoner. Jeg vil imidlertid fremheve at i prinsippet er dette bare en demonstrasjon av at antatt årsak og virkning varierer med de samme frekvenser, og det forklarer i seg selv ikke de prosesser som gjør at årsak leder til virkning.

I dag er vi kommet et godt stykke videre, men det er langt igjen til en fullstendig beskrivelse av klimaet selv under siste istid, eller en dynamisk forståelse av dette. Det er ikke plass til å forfølge dette her, men la meg legge vekt på at det uten tvil er slik at klimapåvirkningen fra de astronomiske faktorene er "ei lita tue som velter stort lass". Med det mener jeg at de nevnte faktorene utløser tilbakekoplingsmekanismer som forsterker klimautslagene. Milankovitch la vekt på snøens refleksjon av innstrålingen, iskjerner fra Antarktis har vist at CO<sub>2</sub> og metan virker som positive tilbakekoplingsmekanismer. Dertil kommer forandringer i havstrømmer og vindsystemer.

### Jan Mangerud

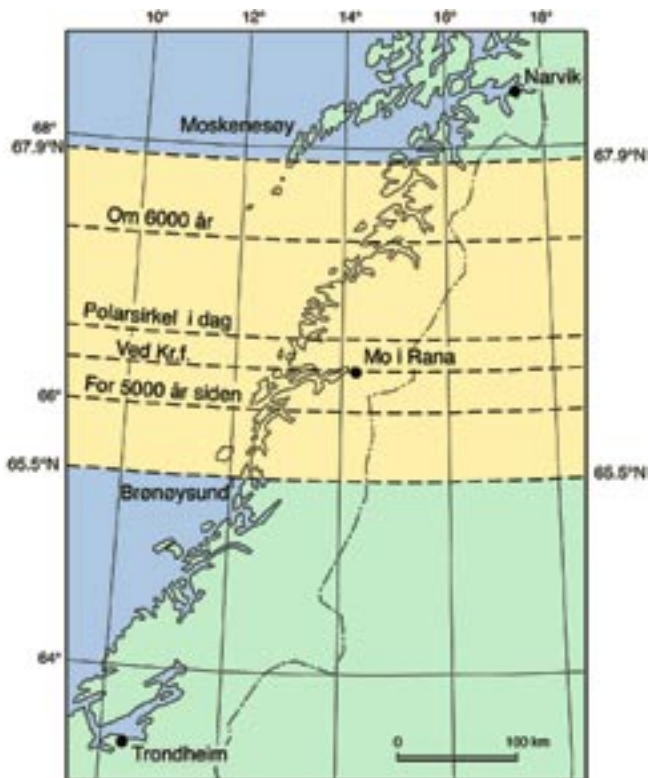
er professor ved Institutt for Geovitenskap og Bjerknes-sentret for klimaforskning ved Universitetet i Bergen. Han arbeider vesentlig i PECHORA-prosjektet som studerer istidshistorie og klimavariasjoner i Nord-Russland. (jan.mangerud@geo.uib.no).

**Figur 4.** Diagrammer som viser hvordan de omtalte faktorer har variert bakover i tid. Det øverste diagrammet viser jordbanens form. Vi ser at det er omlag 100.000 år mellom hver gang den er mest elliptisk.

Jordaksens skråning er gitt som vinkelen mellom aksen og en vertikal linje. Vi ser at den i dag er 23,5°, og at den for tiden avtar: Jorden er i ferd med å "rette seg opp", se figur 3. Det er 41.000 år mellom hver topp.

Perihelion er betegnelsen på det punktet i jordbanen der jorda er nærmest sola. Den tredje kurven viser datoene for perihelion. I dag er perihelion på 4. januar, og vi ser av kurven at den snart vil komme i februar og mars. De siste par-hundretusen år har det vært 23.000 år mellom hver gang perihelion var på samme dato (f.eks. i september, se kurven), men for omlag 400.000 år siden ser vi at kurvene er tettere, da var det ca. 19.000 år mellom hver gang.

Det nederste diagrammet viser hvordan solinnstrålingen har variert i juli på våre breddegrader som en følge av alle faktorene. Vi ser at maksimalutslagene er på omlag 100 watt per kvadratmeter, eller omlag 20 prosent. De store isdekkene over Skandinavia og Nord-Amerika lå på disse breddegrader.



**Figur 3.** Kartet viser hvordan polarsirkelen, altså sydgrensen for midnattssol, vil forflytte seg. Når jordaksen står mest på skrå, ligger polarsirkelen nede ved Brønnøysund, mens når den ligger ved Moskenesøy når aksen mest vertikal. I dag retter aksen seg opp og polarsirkelen beveger seg nordover med en hastighet på 14,4 m i året. Polarsirkelstøtta på Saltfjellet burde derfor egentlig stå på skinner og skyves 14,4 m nordover hvert år. Polarsirkelens posisjon for 5000 år siden (yngre steinalder), ved Kristi fødsel og om 5000 år er tegnet inn.

